塔里木盆地沙尘天气日数变化及影响因素

程红霞[1]，林粤江[2]，陈　鹏[1]，梁凤超[1]，王　勇[1]
（1. 乌鲁木齐气象卫星地面站，新疆 乌鲁木齐　830011；2. 中国气象局气象干部培训学院新疆分院，新疆 乌鲁木齐　830013）

摘　要：基于塔里木盆地32个气象站点1964—2022年观测数据，采用Sen+M-K趋势分析、重心移动模型、标准化回归系数和空间聚类方法，从空间特征角度着重分析塔里木盆地不同类型沙尘年日数的变化、趋势和移动规律，以及影响因素的贡献率。结果表明：(1) 盆地以浮尘为主，其次是扬沙、沙尘暴，总体呈现南多北少的空间分布格局，且具有显著下降趋势。(2) 盆地不同类型沙尘日数的重心呈向东南部移动的趋势，其中沙尘暴重心移动幅度最大。(3) 气温升高、风速降低和大风日数减少是塔里木盆地沙尘日数减少的主要影响因素，降水量影响最小。(4) 降水量对沙尘变化的贡献率高值聚集在盆地西部，平均气温和平均最高气温分别在盆地南部和西部，而大风日数和平均风速分别在盆地西北部和东南部。研究结果可为塔里木盆地有针对性的制定区域适用性防风固沙措施提供科学依据。

关键词：沙尘日数；重心移动模型；影响因素；贡献率；空间聚类；塔里木盆地

沙尘天气是指沙粒、尘土悬浮空中，使空气混浊，能见度降低的天气现象，分为浮尘、扬沙和沙尘暴三种类型[1-2]。沙尘天气可污染自然环境，破坏作物生长，对气候过程、生态系统和人体健康都有重要影响，是干旱地区特有的一种灾害性天气[3-4]。同时，沙尘气溶胶作为地球系统的重要组成部分，对辐射、冰云和碳循环均有重要作用，是气候环境变化的指示器。随着全球变暖的持续加剧，作为沙尘天气高发区之一的塔里木盆地（Tarim Basin）受到显著影响，盆地沙尘天气的研究已经引起了社会和政府的高度重视[3]。

目前，许多学者从不同方法和研究角度分析了塔里木盆地沙尘天气，研究的侧重点主要包括：沙尘天气的气候学特征、地理特征、时间变化特征和其影响因素、以及沙尘源地和移动路径等方面，并且指出气象要素变化是导致沙尘产生-维持-消散过程的主要驱动因子[4-11]。此外，有些学者将沙尘发生的过程和日数作为因子进行聚类分析，分析了沙尘天气的区域特征[12]。但是，以前的一些研究工作主要集中在沙尘天气和其相关要素的统计关系，在沙尘天气的空间分布和时间变化的研究中仍然存在一些问题。沙尘天气的空间分布特征与气象要素有着十分密切的关系，但不同地区与气象要素的关系也有所差异[13]。由于现有沙尘变化和其影响因素分析从站点数据出发，只考虑样本属性之间的模型分析，忽略了地理现象本身的区域和地带特性，如只将沙尘日数或影响因素作为唯一考虑因素，将大小相近的站点化为一类，则分组的站点就会比较分散，分析结果难以运用于实际管理，这些对天气学分析和制定区域性防灾政策造成一定的困难。因此，沙尘变化和其影响因素的分析还需要从空间特征角度进行深入研究。

为了全面了解沙尘天气随时间在空间上的变化和影响因素贡献率的分布格局，需要在空间上准确量化和分析沙尘变化及其影响因素贡献率的分布特征。因此，研究基于塔里木盆地32个气象站观测资料，利用Sen+M-K趋势法和重心移动模型分析1964—2022年塔里木盆地不同类型沙尘日数年变

收稿日期：2023-05-10；　**修订日期：**2023-07-17
基金项目：新疆维吾尔自治区重点任务研发专项（2022294425）；新疆气象局引导性计划项目（YD202215）；国家自然科学基金项目（41965002）；新疆维吾尔自治区自然科学基金青年科学基金项目（2022D01B09）
作者简介：程红霞（1977-），女，博士，主要从事遥感和地理信息系统应用方面的研究. E-mail: chx69@163.com
通讯作者：王勇. E-mail: 443409880@qq.com

化的时空特征，并运用标准化回归系数和空间聚类方法评估其影响因素的贡献率。从空间上分析沙尘变化及其影响因素，确定塔里木盆地何地何种沙尘天气的重要影响因素，以期全面了解影响因子的空间分布特征，有助于相关部门针对不同地区采取有效的区域性防沙减沙策略，对区域生态建设和沙漠化防治有一定的指导意义。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国新疆南部，处于天山和昆仑山之间，是中国面积最大的内陆盆地，覆盖了南疆90%以上的地区。盆地地貌呈环状分布，是大型封闭性山间盆地，包含地球上第二大流沙沙漠塔克拉玛干沙漠，地势西高东低，微向北倾。盆地属于暖温带气候，以东北风和西北风为主，多风沙和浮尘天气，是我国沙尘天气发生频率较高的地区，同时也是中亚沙尘暴区的一个重要贡献源[7,9]。研究区及站点分布如图1所示。

1.2 数据来源与处理

沙尘天气为浮尘、扬沙、沙尘暴的统称。按照观测记录中沙尘天气出现时能见度大小，将沙尘天气分为浮尘、扬沙和沙尘暴来进行统计，其中，浮尘和扬沙为弱沙尘天气，沙尘暴为强沙尘天气。依据《地面气象观测规范》，若研究区每个气象站点的沙尘天气出现跨日界的沙尘天气时，统计为两个沙尘天气日；若一日中同时出现沙尘暴、扬沙、浮尘的两种或以上记录时，则分别统计不同类型的沙尘天气日数，但只统计一个沙尘天气日，因此，沙尘天气日数可能小于或等于扬沙、浮尘和沙尘暴日数的总和[1]。

从中国气象局国家气象信息中心获得1964—2022年塔里木盆地32个气象观测站，包括浮尘日数、扬沙日数、沙尘暴日数和沙尘天气日数。经查阅文献[7,14-17]，基于影响因素的代表性和数据的可获得性，选择平均气温、平均最高气温、平均最低气温、降水量、年降水日数、大风日数和平均风速作为沙尘天气日数的影响因素进行分析。

1.3 研究方法

1.3.1 时空变化分析方法

（1）Theil-Sen Median趋势分析和Mann-Kendall检验

Theil-Sen Median趋势分析是一种稳健的非参数统计趋势计算方法，计算效率高，对于测量误差和离群数据不敏感，常被用于长时间序列数据的趋势分析中，通常与Mann-Kendall非参数检验结合使用，即先计算Theil-Sen Median趋势值，然后使用Mann-Kendall方法判断趋势显著性。本文利用此方法用以识别沙尘日数具有统计显著变化的站点。

Theil-Sen Median趋势分析计算公式如下：

$$Slope = \mathrm{Median}\left(\frac{y_j - y_i}{j - i}\right),\ j > i \qquad (1)$$

式中：*Slope* 为趋势值；Median代表取中值；y_i 和 y_j 分别为第 i 年和第 j 年的沙尘天气日数年值。若 $Slope > 0$，表示沙尘天气日数呈减少趋势。*Slope* 绝对值越大表示沙尘天气日数增加或减少的速率越快。

Mann-Kendall属于非参数检验方法，与其他参

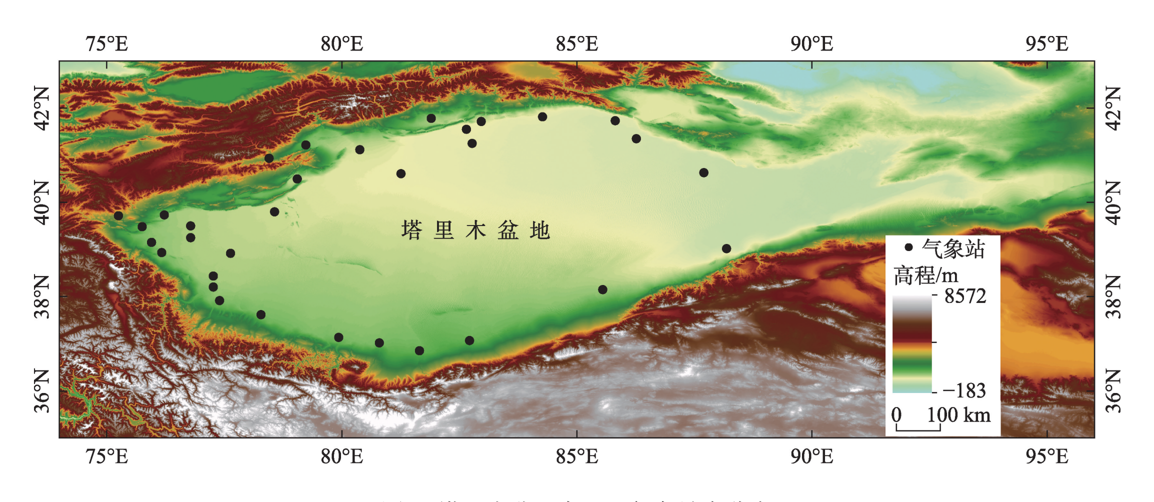


图1 塔里木盆地高程和气象站点分布

Fig. 1 Spatial distribution of altitude and meteorological stations in Tarim Basin

数检验的方法相比，不需要样本遵从正态分布，不受缺失值和异常值干扰，更适合顺序变量，用于分析时间序列数据的持续增加或减少趋势（单调趋势）。计算公式为：

$$Z=\begin{cases}\frac{S-1}{\sqrt{\mathrm{var}(S)}}, S>0\\ 0, \quad S=0\\ \frac{S+1}{\sqrt{\mathrm{var}(S)}}, S<0\end{cases} \quad (2)$$

$$S=\sum_{j=1}^{n-1}\sum_{i=j+1}^{n}\mathrm{sgn}(y_j-y_i) \quad (3)$$

$$\mathrm{var}(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

式中：n为时间序列中数据个数；sgn为符号函数；y_i和y_j含义同上；$\mathrm{var}(S)$是S的方差；Z是检验统计量。采用双边趋势检验，在给定显著性水平α下，当$|Z|\leqslant Z_{1-\alpha/2}$时，接受原假设，即趋势无显著性；若$|Z|>Z_{1-\alpha/2}$，则拒绝原假设，即认为趋势存在显著性。本文判断在90%置信水平下的沙尘日数时间序列变化趋势的显著性[18]。

（2）重心移动模型

为分析1964—2022年塔里木盆地沙尘日数移动特征，本研究通过连接时间序列塔里木盆地气象站点沙尘日数的重心及其偏移量，分析年变化的轨迹、方向和速度，公式如下：

$$\overline{X}_j=\frac{\sum_{i=1}^{n}w_{ij}x_i}{\sum_{i=1}^{n}w_{ij}}, \overline{Y}_j=\frac{\sum_{i=1}^{n}w_{ij}y_i}{\sum_{i=1}^{n}w_{ij}} \quad (5)$$

式中：n为塔里木盆地气象站点总数；x_i和y_i是气象站点i的坐标；w_{ij}为气象站点i的第j年某类沙尘年日数；（$\overline{X}_j$，$\overline{Y}_j$）是第j年某类沙尘年日数重心的坐标[19]。如：若w_{ij}为气象站点i的第j年浮尘年日数，则（$\overline{X}_j$，$\overline{Y}_j$）就是第j年浮尘年日数重心的坐标。

1.3.2 影响因素分析方法

（1）标准化回归系数

标准化回归系数是指剔除因变量和自变量的尺度影响后的回归系数。回归系数的绝对值直接反映了自变量对因变量的影响程度，绝对值越大，对自变量影响程度越大，反之亦然。以某一自变量对应系数的绝对值与所有回归系数绝对值之和的比值定义该自变量对因变量的相对贡献率。在此，本文利用标准化回归系数法在年尺度上讨论各气象因子对塔里木盆地沙尘日数的相对贡献率，公式如下：

$$\begin{cases}Y=a_1x_1+a_2x_2+\cdots+a_nx_n+b\\ CR_i=\frac{|a_i|}{|a_1|+|a_2|+\cdots+|a_n|}\times100\%\end{cases} \quad (6)$$

式中：Y为沙尘天气日数年值的标准化值；a_n为第n个气象因子与Y的标准化回归系数；x_n为第n个气象因子的标准化值；b为常数；CR_i代表第i个气象因子对Y的相对贡献率[15,20]。

（2）空间聚类

空间聚类是空间位置与专题属性信息共同发生作用的聚类，用来刻画空间单元属性值的分布格局与分布特征，特别是分析聚集发生的位置[21]。热点分析方法是空间聚类的常用方法，通过对每个气象因子贡献率进行空间聚类，识别气象因子贡献率的高值空间聚集（热点区）。计算公式如下：

$$G_i^*(d)=\sum_{j=1}^{n}w_{ij}(d)x_j/\sum_{j=1}^{n}x_j \quad (7)$$

$$Z(G_i^*)=\frac{G_i^*-E(G_i^*)}{\sqrt{\mathrm{var}(G_i^*)}} \quad (8)$$

式中：$G_i^*(d)$是热点的统计量；$Z(G_i^*)$、$E(G_i^*)$和$\mathrm{var}(G_i^*)$分别是G_i^*的标准化、期望值和变异系数；x_j是要素j的属性值；$w_{ij}(d)$是要素i和j之间的空间权重；n为要素总数。当$Z(G_i^*)$值为正且显著时，表明要素i为高值集聚的热点区域[22]。

2 结果与分析

2.1 沙尘日数空间分布

2.1.1 年均值空间分布特征 根据32个气象台站的多年平均沙尘日数，得到塔里木盆地浮尘、扬沙、沙尘暴和沙尘天气年平均日数的空间分布特征（图2）。1964—2022年，塔里木盆地沙尘天气主要以浮尘为主，扬沙次之，沙尘暴日数相对较少，沙尘天气总体上呈现南多北少的地域分布特征。不同类型沙尘年日数的空间分布不尽相同，其中，浮尘年平均日数较高，约77 d，平均最小日数是盆地北缘的拜城（19 d），平均最大日数是盆地南缘的和田（187 d），空间上主要集中在塔里木盆地南部，年平均日数均在百日以上；扬沙年平均日数均值为31 d，平均最小日数是盆地西端的乌恰（2 d），平均最大日数是盆地西南部的皮山（75 d），总体上是南多北少；沙尘暴年

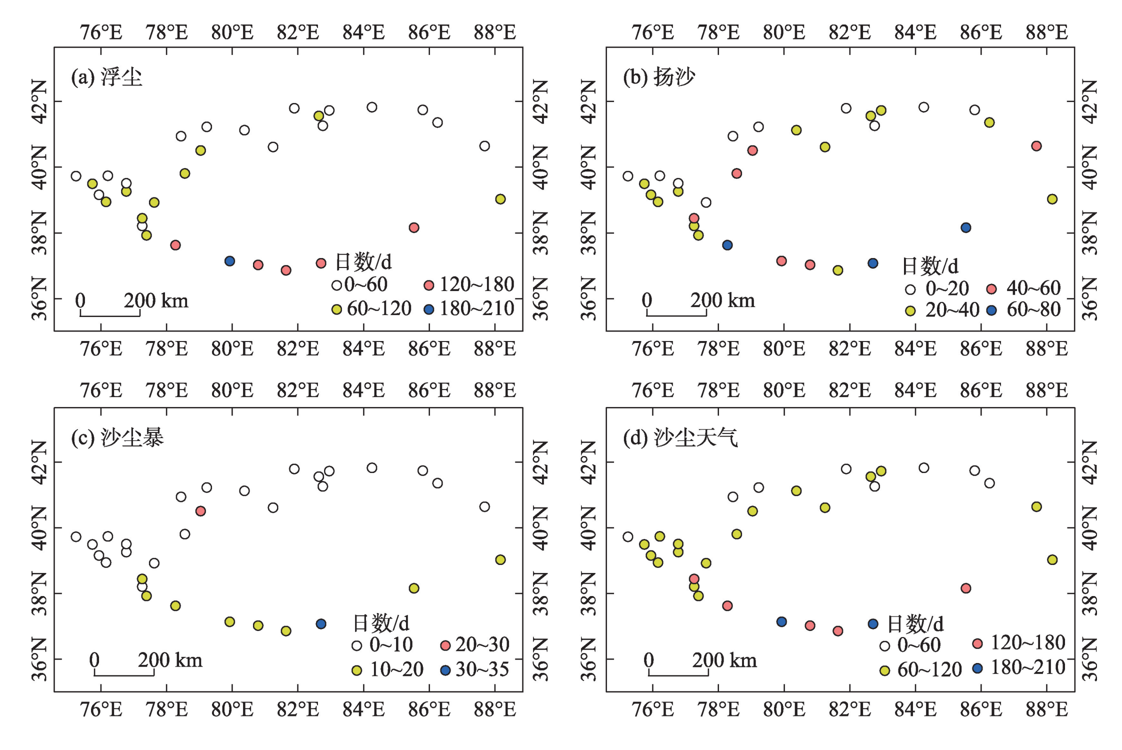


图2 1964—2022年塔里木盆地不同类型沙尘日数年均值

Fig. 2 Annual mean number of dust days of various types from 1964 to 2022 in Tarim Basin

平均日数在9 d,盆地北部除柯坪较高外,其余站点均在10 d以下,处于较低值,而盆地南部是高值区,均在10 d以上,特别是盆地南缘的民丰沙尘暴年平均日数具有最大值(31 d);沙尘天气年平均日数均值为89 d,平均最小日数是拜城(22 d),平均最大日数是和田(190 d),与浮尘年平均日数的空间分布极为相似。综上所述,整体上,1964—2022年塔里木盆地北缘沙尘天气较少,且离盆地沙漠中心越远,沙尘天气越少,例如,拜城沙尘天气都普遍偏少,而盆地南缘以和田为中心,由西向东从莎车至且末一带是沙尘天气的高值区,尤其是和田和民丰的沙尘天气最多,有半年以上都是沙尘天气。这可能一方面与该地区位于沙漠附近,植被覆盖度低,生态环境脆弱有关系,另一面塔里木盆地天气系统和地形作用加剧了沙尘天气的多发[23]。因此,这些沙尘天气高发地区需要高度关注沙尘天气的治理,防范沙尘天气的不利影响。

2.1.2 变化趋势空间分布特征 通过计算趋势值和M-K检验来分析沙尘天气变化的幅度(增加或减少的量值)和性质(显著增加还是显著减少,在0.1水平或$P<0.1$时具有统计学意义)。从图3和表1可以看出,1964—2022年塔里木盆地浮尘日数、扬沙日数、沙尘暴日数和沙尘天气日数年变化的趋势均呈减少趋势,变化斜率分别在−2.62~0.53 d·a^{-1}、−1.44~0.20 d·a^{-1}、−0.84~0.01 d·a^{-1}和−2.57~0.72 d·a^{-1},且具有显著的区域性差异特征。其中,浮尘日数年变化趋势最为明显,除塔里木盆地北缘的轮台呈显著增加趋势和西南部的麦盖提呈不显著增加趋势外,其他站点均呈现减少趋势,且显著减少站点的比例为87.5%(所有百分比均从总气象站点数中计算出);在扬沙日数年变化趋势中,除塔里木盆地北缘的轮台和东南缘的若羌存在显著增加趋势,其他站点均呈现减少趋势,且显著下降站点比例为84.38%;在沙尘暴日数年变化趋势中,除塔里木盆地北缘的轮台呈略微增长趋势,其他站点均呈现减少趋势,且显著下降站点比例为87.5%;在沙尘天气日数年变化趋势中,除塔里木盆地北缘的轮台站呈现显著增加趋势,其他站点均呈现减少趋势,且显著下降站点比例为90.63%。上述分析表明,1964—2022年塔里木盆地沙尘日数年变化整体上呈现显著下降趋势,且减少趋势站点数量远大于增加趋势站点数量。沙尘日数减少有几方面的原因,在气候因素方面,随着全球气候变暖,冷空气和大风出现频次均呈现减少趋势,使引发沙尘天气的动力条件减弱,导致沙尘日数减少;在人为方面,生态文明建设和生态环境保护措施的实施见成效,例如,且末县防

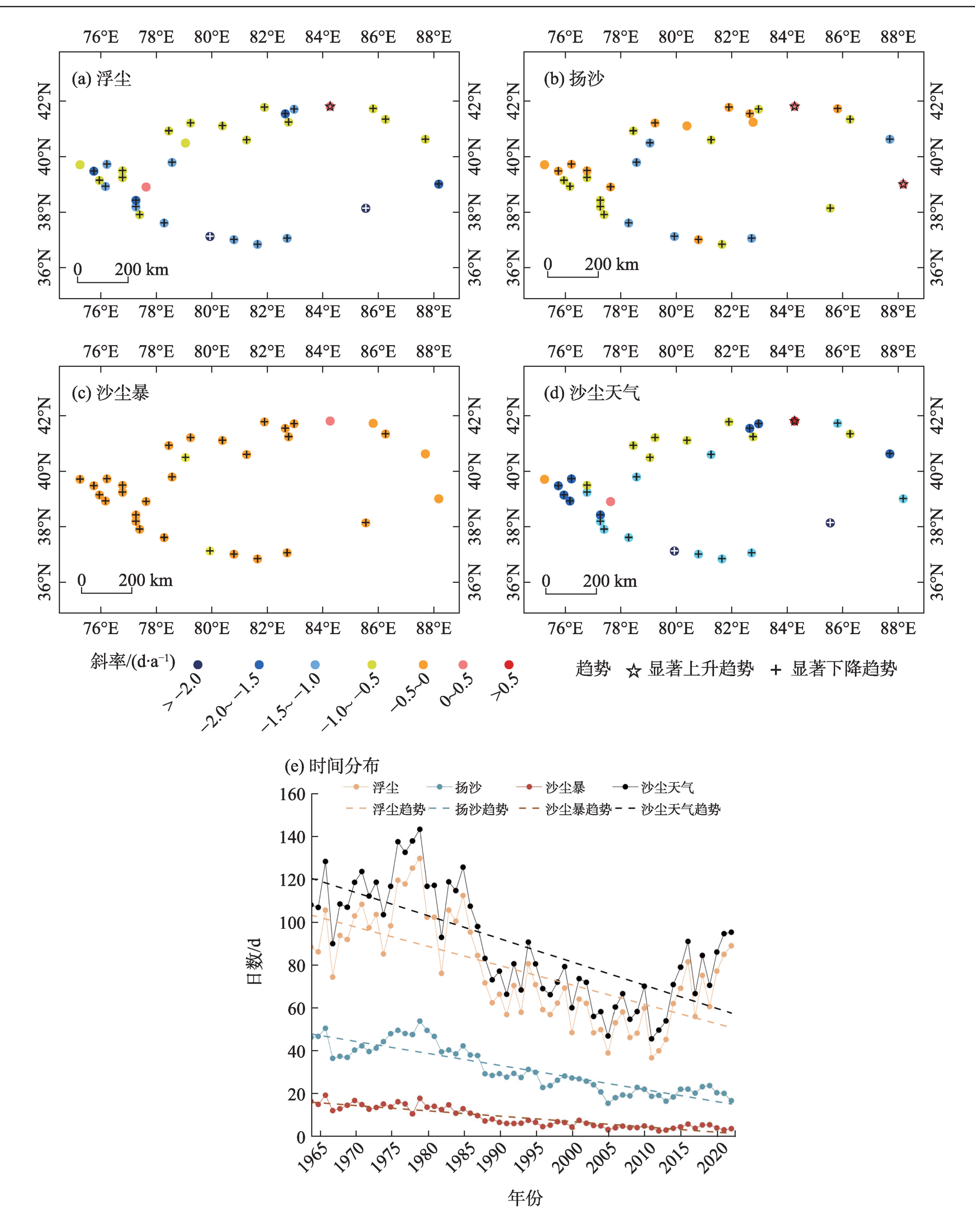


图3 1964—2022年塔里木盆地不同类型沙尘日数时空变化趋势

Fig. 3 Spatial and temporal trend of slope and trend of dust days of various types from 1964 to 2022 in Tarim Basin

表1 塔里木盆地不同类型沙尘日数趋势分布

Tab. 1 Trend of dust days of various types in Tarim Basin

	均值/(d·a⁻¹)	增加趋势站点数量	减少趋势站点数量	显著增加趋势		显著减少趋势	
				站点数量	均值/(d·a⁻¹)	站点数量	均值/(d·a⁻¹)
浮尘日数	−0.98	2	30	1	0.53	28	−1.13
扬沙日数	−0.57	2	30	2	0.19	27	−0.68
沙尘暴日数	−0.22	1	31	0		28	−0.25
沙尘天气日数	−1.16	2	30	1	0.72	29	−1.30

沙治沙工程通过在绿洲和沙漠的交界处种植近万公顷防风固沙林来阻截流沙，降低来自东北的大风、有效地遏制沙漠扩展移动，改善了且末县的局地小气候环境，沙尘年日数呈显著下降趋势，生态环境在逐渐改善。

进一步分析塔里木盆地沙尘年日数的变化趋势发现，塔里木盆地南部沙尘天气变化幅度大于塔里木盆地北部。沙尘天气变化趋势最明显地区的是塔里木盆地南部，浮尘和扬沙日数减小幅度均处于整个盆地的较大值，浮尘日数变化斜率在−0.98 $d \cdot a^{-1}$左右，扬沙日数变化斜率在−0.57 $d \cdot a^{-1}$左右，即易于发生沙尘天气的区域也是沙尘发生日数减小趋势最为显著的区域。但需要注意的是，塔里木盆地部分区域沙尘天气仍在增长，呈增加趋势的站点均在盆地北部和东南部，例如，轮台的浮尘、扬沙和沙尘天气日数均呈显著增长趋势，分别为0.53 $d \cdot a^{-1}$、0.18 $d \cdot a^{-1}$和0.72 $d \cdot a^{-1}$；若羌的扬沙日数均呈现显著增长趋势，为0.20 $d \cdot a^{-1}$，对这些地区应加快加大相应生态恢复和防沙治理政策的实施力度，从而达到整体改善的目的。

2.2 沙尘日数重心轨迹

重心运动轨迹可从空间上直观描述塔里木盆地不同类型沙尘年日数分布格局的演变规律。为了便于比较，选择相同地理空间视图显示不同类型沙尘年日数的重心轨迹。由图4可知，1964—2022年不同类型沙尘年日数的重心位于盆地中西部，除浮尘年日数重心位置相近，其余均向东南方向移动，移动幅度差异较大，其中，沙尘暴年日数移动幅度最大，区域差异性较大，空间集聚性最低，其次是扬沙年日数，沙尘天气年日数和浮尘年日数重心较集中，且移动幅度相对较小，年际变化较为平稳。沙尘日数重心移动是受到多种因素综合作用的结果，这里主要有两个方面原因：一方面是气候变化，盆地大部分地区的沙尘天气呈减少趋势，但盆地北部不同类型沙尘年日数较小，减小趋势值也较小，而盆地南部和东南部沙尘年日数最大，减少趋势均较大，但减小比例最小；另一方面是下垫面和地形特征的影响，盆地沙尘天气多为“东灌”和“西翻”，塔克拉玛干沙漠的东部边缘是低海拔沙尘从盆地流出的唯一低海拔开口，且盆地东南部多为荒漠，植被覆盖度低和地表稳定性差，例如，盆地东南部的若羌受塔克拉玛干沙漠、库木塔格沙漠和库木库里三大沙漠的环绕，沙尘天气日数年均值在百日以上，且在盆地沙尘天气明显减少的大背景下，其扬沙日数呈增长趋势，沙尘暴日数弱减少，因此，整体上盆地沙尘年日数重心向东南方向移动。

2.3 影响因素的空间特征

2.3.1 *影响因素贡献率空间分布特征* 为了研究不同气象因子对塔里木盆地不同类型沙尘日数变化的影响，根据公式(6)，分别计算了7个气象因子的贡献率。图5给出了各站点气象因子对不同类型沙尘日数的贡献率。表2给出了盆地每个气象因子贡

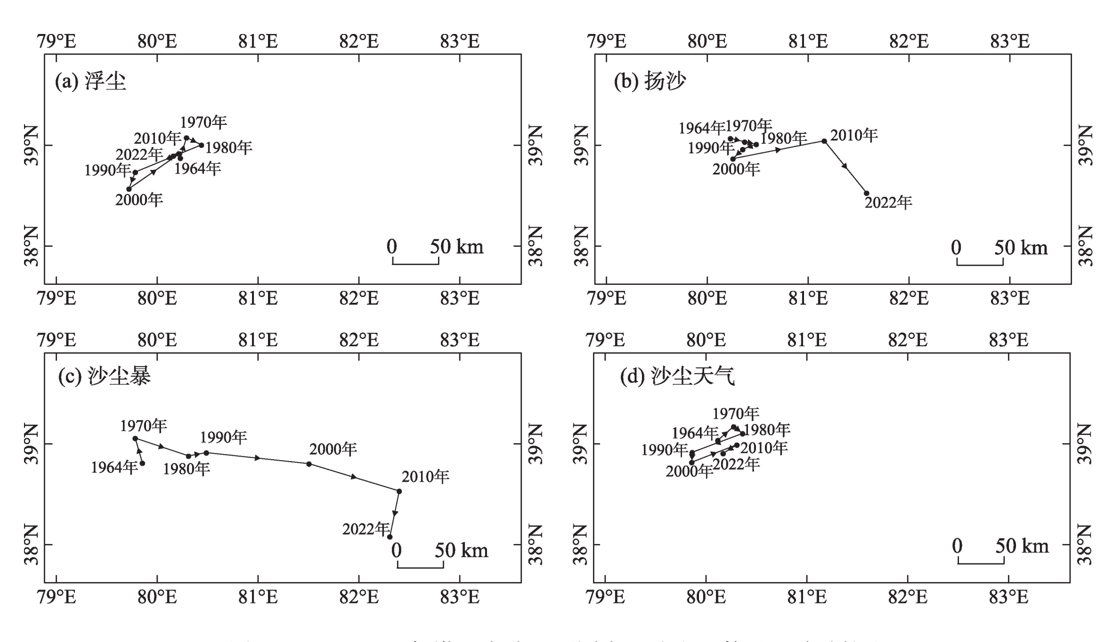


图4 1964—2022年塔里木盆地不同类型沙尘日数重心移动轨迹

Fig. 4 Trajectory of gravity centers of dust days of various types from 1964 to 2022 in Tarim Basin

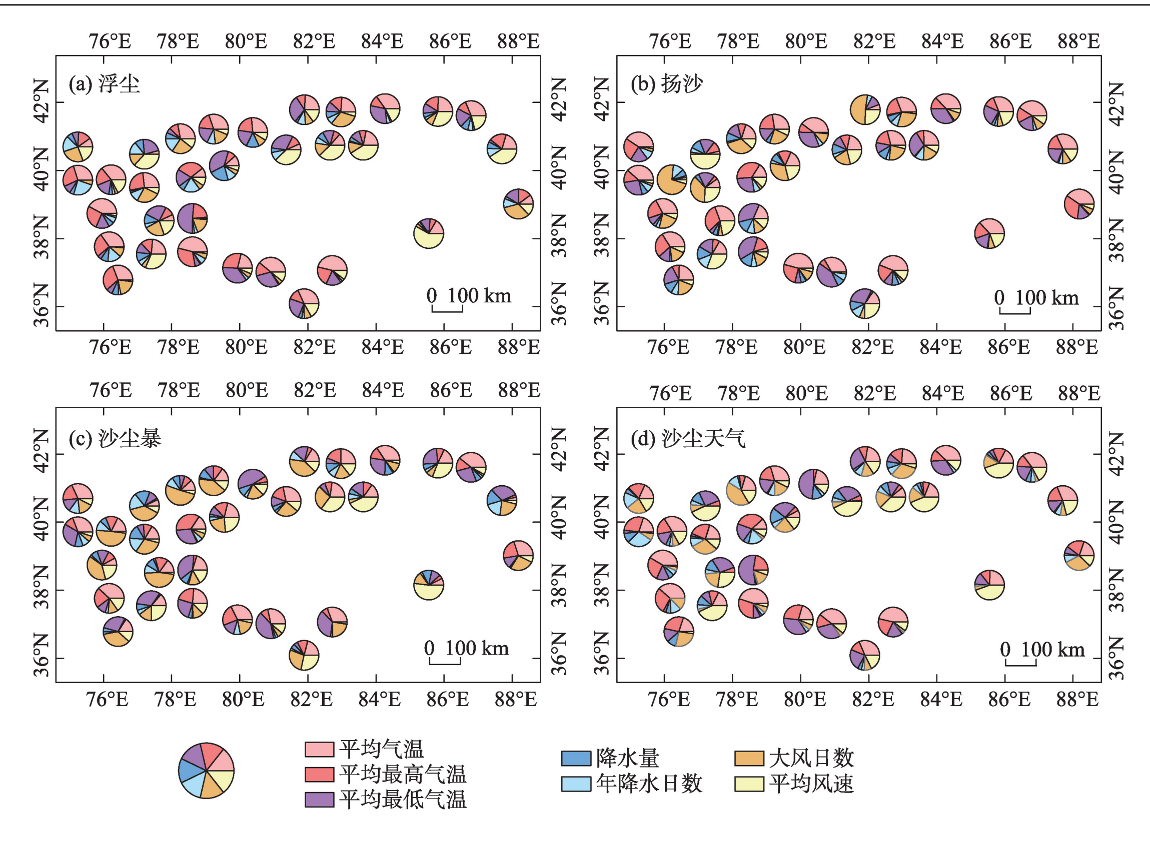


图5　各影响因素对塔里木盆地不同类型沙尘日数的贡献率

Fig. 5　Contribution rate of influencing factors to dust days of various types in Tarim Basin

献率的平均值。

温度影响着地表环境与气候变化，进而改变沙源与热力条件，对塔里木盆地的沙尘天气影响最大。与温度相关的主要指标有平均气温、平均最高气温和平均最低气温，变化趋势分别为0.02 ℃·a^{-1}、0.02 ℃·a^{-1}和0.03 ℃·a^{-1}，均呈增加趋势。温度的升高导致大气温压场结构变化，减弱了冷空气势力，起沙活动发生的动力条件也变弱，从而表现出沙尘日数减少[24]。从贡献率大小可以看出，平均气温比平均最高气温和平均最低气温的贡献率较大，均值在20%以上，主要对盆地南部和西部的浮尘、扬沙和沙尘天气的减少有较大贡献。

风速的主导作用在盆地沙尘日数的年际变化中也很明显。人们也已认识到，大风是影响沙尘事件的关键气象因子，在起沙和输送过程中都起着至关重要的作用[16]。与风速相关的影响因素是大风日数和平均风速，年际变化趋势分别为−0.23 d·a^{-1}和−0.01 m·s^{-1}·a^{-1}。大风日数的减少和平均风速的降低使得盆地起沙的动力条件减弱，导致沙尘天气明显减少，可认为是影响盆地沙尘日数整体下降的主要气象因子。从不同类型沙尘日数的贡献率看，这两个气象因子的影响程度变化较大，例如，平均风速对浮尘、扬沙、沙尘暴和沙尘天气的影响很明显，贡献率均值在12%~18%，主要分布在盆地北部和西南部；大风日数对沙尘暴的贡献率较高，贡献率均值为22.55%，对浮尘、扬沙和沙尘天气的贡献率均值在11%~17%，主要分布在盆地西部。

值得注意的是，降水量对盆地沙尘天气的贡献

表2　塔里木盆地沙尘日数影响因素贡献率均值

Tab. 2　Mean contribution rate of influencing factors of dust days of various types in Tarim Basin

	平均气温	平均最高气温	平均最低气温	降水量	年降水日数	大风日数	平均风速
扬沙	23.89	17.04	17.76	5.61	7.70	11.07	16.93
浮尘	26.43	15.14	18.36	5.94	5.09	16.28	12.76
沙尘暴	20.52	11.86	18.57	6.50	5.81	22.55	14.19
沙尘天气	22.72	16.33	17.92	5.36	6.64	13.09	17.94

率最小,主要分布在盆地西部和北部。这主要是因为塔里木盆地深居内陆,四周高山阻隔,水汽难以到达盆地内部,导致盆地内气候干旱,年平均降水量和降水日数分别为73.86 mm和30 d,降水稀少。降水的增加会改变地表环境,抑制沙尘事件的发生。虽然受全球暖湿化影响,塔里木盆地降水量和降水日数均有一定的增加,但盆地降水基数低,增加的绝对量很小,趋势变化率仅为0.64 $mm \cdot a^{-1}$和0.11 d,降水量增多速率缓慢,盆地降水量仍处于非常低的水平,因此,降水量对沙尘日数的作用相对较小。

总体上,热力因子和动力因子是影响塔里木盆地沙尘日数变化的主要因素,而水分因子的影响较弱。气温和风速为沙尘天气的发生与发展提供了动力条件,对沙尘天气的贡献率较高,是影响沙尘天气变化的主要原因,降水量的贡献率是所有气象因素中最低,贡献率均值在10%以下。

2.3.2 *影响因素贡献率的空间聚类* 气象因子的空间差异性造就了不同区域沙尘事件的时空变化,空间聚集特征可揭示气象因子对沙尘事件影响的区域性分布,从而有利于开展针对性的区域性措施抑制沙尘事件的发生。利用热点分析方法计算了贡献率高值在空间上的集聚区域(热点),通过显著性检验的热点分布如图6所示。

不同类型沙尘日数影响因素贡献率热点主要分布在盆地西部和南部,而盆地东北部和东部地区的热点较少。从不同类型沙尘日数影响因素贡献率高值聚集区域(热点)的空间分布上看,在浮尘中,盆地南部是平均温度和平均最低温度,西南部主要是平均最高温度,西部主要是平均最高温度、年降水日数和降水量,盆地北部主要是降水量,东南部是平均风速;在扬沙中,盆地西北部是大风日数和平均风速,盆地南部和西部是降水量和年降水日数;在沙尘暴中,盆地西部是年降水日数和大风日数,北部是降水量,东南部且末是平均风速;在沙尘天气中,盆地北部库车是平均风速,南部是平均气温,西南部是平均最高气温,而盆地西部是平均最高气温、降水量和年降水日数。从影响因素贡献率的空间聚集区域看,降水量贡献率热点最多,空间聚集性高,主要分布在盆地西部,其次是温度、大风日数和平均风速较低。这主要是由于全球变暖导致的水循环过程加剧使大气环流所携带的水汽含量增加,受天气系统路径、水汽条件、大气环流和地形影响,降水增加集中在盆地西部,而温度显著

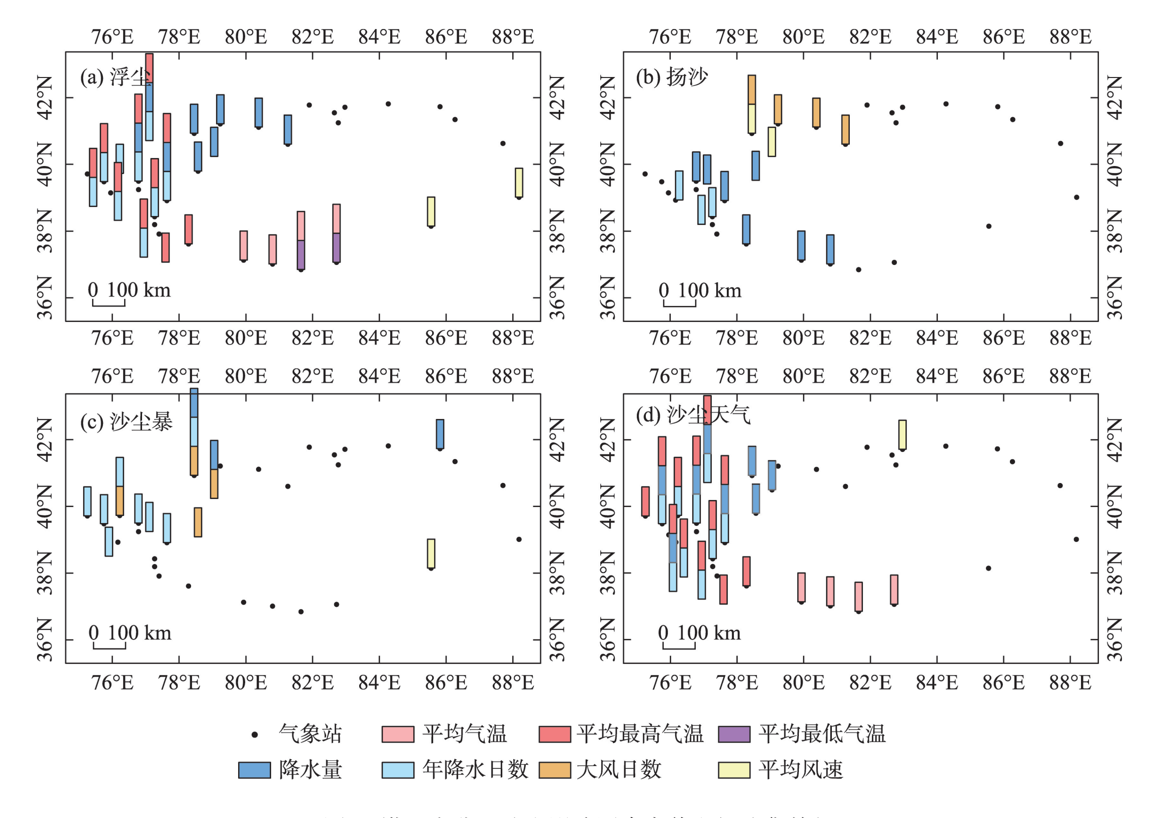


图6 塔里木盆地沙尘影响因素高值空间聚集特征

Fig. 6 High-value spatial clustering for influencing factors of dust days in Tarim Basin

升高地区集中在盆地西部和南部,这些区域成为对沙尘日数的减少贡献较高的聚集区域;同时,塔里木盆地大风天气发生次数较多且稳定的地区主要在受翻山风影响的西北部和受东灌大风影响的东部[16],导致大风和风速对沙尘日数贡献较高的区域主要集中在西北部和东部。总体上看,沙尘日数变化受多重因素的影响,且不同类型沙尘日数影响因素贡献率在不同地区表现出不同的空间关系。

3　讨 论

本研究利用时空统计分析方法完成了塔里木盆地不同类型沙尘日数的变化特征、趋势和影响因素的空间分析,提供了更为直观的沙尘天气和其影响因素的时空特征,不仅可以帮助我们更深一步了解塔里木盆地沙尘天气的时空变化趋势,还可以认识到沙尘天气影响因素的重点分布区域。1964—2022年塔里木盆地浮尘日数 > 扬沙日数 > 沙尘暴日数,呈显著减少趋势,空间分布形态基本以南多北少为主,高值区主要分布在盆地南部,这与杨婕、马禹、王森和Mu等的研究结果基本一致[4,7,15,25]。作为我国生态安全战略格局"两屏三带"中"北方防沙带"和生态文明廊道的重要组成部分,塔里木盆地沙尘天气减少主要得益于塔里木盆地周围多年来实施的防风固沙生态建设项目[11,26-27],例如,塔里木河重要源流区(阿克苏河流域)山水林田湖草沙一体化保护和修复工程、柯柯牙荒漠绿化防护林工程和且末防沙治沙造林工程,以及塔里木河下游生态输水工程等,使得盆地地表植被覆盖得到明显改善,有效地遏制了盆地沙尘天气的发生频率,植被生态稳定性以及抵御沙尘的能力得到加强。但是,通过进一步研究沙尘日数变化的空间特征,发现盆地局部区域沙尘日数仍存在增长趋势,例如,塔里木盆地北缘的轮台和东南缘的若羌,且盆地的沙尘日数重心有向东南方向移动的趋势,特别是沙尘暴日数重心移动路线复杂且幅度最大,这一结果需要相关部门重点关注。同时,归因研究是沙尘日数变化研究中的重要内容,根据沙尘日数变化影响因素贡献率的空间分析可以看出,气温升高、平均风速降低和大风日数减少是盆地沙尘日数减小的主要原因,但不同类型沙尘日数影响因素的贡献率存在显著的空间差异性。在当前全球极端灾害天气频发的大背景下,沙尘是塔里木盆地的重要灾害天气,政策决策部门制定合理有效的防灾减灾措施不仅要着眼于沙尘天气和其影响因素在站点的变化分析,更应该注意到整个塔里木盆地的时空变化,充分考虑局地和全局的分布特征,从而构建更有针对性的区域适用性防风固沙体系,对有效降低塔里木盆地沙尘危害具有重要理论价值和实践意义。

此外,塔里木盆地地广人稀,具有长时间序列的沙尘天气观测站点集中于盆地周边地区,由于盆地中心塔中站从1999年开始观测沙尘天气,因此,研究未考虑盆地中心沙尘天气的分析。位于塔里木盆地腹地的塔中站(39°00′N、83°38′E,海拔1103 m)是深入流动沙漠腹地200 km以上的大气环境观测站,受人类活动影响较小,对气候变化响应极为敏感。1999—2022年塔中站沙尘日数呈显著增加趋势,其中,浮尘年平均日数为125 d,变化斜率为3.54 $d \cdot a^{-1}$;扬沙年平均日数为82 d,变化斜率为1.21 $d \cdot a^{-1}$;沙尘暴年平均日数为16 d,变化斜率为0.38 $d \cdot a^{-1}$;沙尘天气年平均日数为146 d,变化斜率为3.35 $d \cdot a^{-1}$。与同期盆地其他站点相比,塔中站浮尘年平均日数仅低于民丰和和田,扬沙年平均日数位居盆地第一,沙尘暴和沙尘天气年平均日数均仅低于民丰。以上可以看出,塔里木盆地腹地的塔中站是除盆地南部民丰外的又一沙尘日数高值区。在未来的研究中,可选择合适的研究时段加入塔中站沙尘天气观测数据,从而全面细致地进一步探讨塔里木盆地沙尘天气的变化特征。

4　结 论

通过对塔里木盆地沙尘日数变化及其影响因素贡献率的空间特征分析,得出以下结论:

(1) 1964—2022年塔里木盆地沙尘天气以浮尘为主,呈南多北少的空间分布格局,整体为显著减少趋势。浮尘日数、扬沙日数、沙尘暴日数和沙尘天气日数的减少速率分别为−0.98 $d \cdot a^{-1}$、−0.57 $d \cdot a^{-1}$、−0.22 $d \cdot a^{-1}$和−1.16 $d \cdot a^{-1}$,减少趋势的站点大于增加趋势的站点,其中显著减少的站点比例分别为87.50%、84.38%、87.50%和90.63%,主要分布于盆地南部。

(2) 1964—2022年塔里木盆地沙尘天气重心总体向东南方向推移,沙尘暴日数重心移动轨迹较为

复杂,移动幅度最大,其次是扬沙日数,沙尘天气日数和浮尘日数重心移动轨迹比较集中,且移动幅度较小。

(3) 温度增加和大风减弱对塔里木盆地不同类型沙尘日数减小起主导作用,而降水的贡献率最小,仅6%左右。其中,平均气温对沙尘日数减少的贡献率最高,主要分布在盆地南部和西部;平均风速对浮尘、沙尘天气的贡献率较高,主要分布在盆地北部和西南部;大风日数对扬沙和沙尘暴的贡献率较高,主要分布在盆地北部和东南部。

(4) 气象因子对沙尘变化的高值贡献率在空间上存在明显聚类。空间聚类结果表明,降水量和年降水日数对沙尘变化的贡献率高值聚集区域最大,主要分布在盆地西部,温度对浮尘日数和沙尘天气日数变化的贡献率高值聚集在盆地南部和西部,而大风日数对扬沙日数变化的贡献率高值聚集在盆地西北部,平均风速对浮尘日数和沙尘暴日数变化的贡献率高值聚集在盆地东南部。

参考文献(References):

[1] 国家气象中心. 沙尘天气等级(GB/T 20480-2017)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [National Meteorological Center. Classification of Sand and Dust Weather (GB/T 20480-2017) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]

[2] 中国气象局气象探测中心. 地面气象观测规范 天气现象(GB/T 35224-2017)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [Meteorological Detection Center, China Meteorological Administration. Specifications for Surface Meteorological Observation—Weather Phenomenon (GB/T 35224-2017) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]

[3] Mao R, Gong D Y, Kim S J, et al. Increasing spring dust storms in the future over the Taklimakan Desert, Northwest China: Implications from changes in circulation pattern frequency in CMIP6[J]. Environmental Research Communications, 2021, 3(11): 111002.

[4] 杨婕, 赵天良, 程叙耕, 等. 2000—2019年中国北方地区沙尘暴时空变化及其相关影响因素[J]. 环境科学学报, 2021, 41(8): 2966-2975. [Yang Jie, Zhao Tianliang, Cheng Xugeng, et al. Temporal and spatial variations of sandstorm and the related meteorological influences over northern China from 2000 to 2019[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(8): 2966-2975.]

[5] 陈晶, 郭晓宁, 白文娟, 等. 近60 a柴达木盆地沙尘天气时空变化特征及其影响因子[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1040-1047. [Chen Jing, Guo Xiaoning, Bai Wenjuan, et al. Spatiotemporal characteristics and influencing factors of dust weather in Qaidam Basin in recent 60 years[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1040-1047.]

[6] 马禹, 肖开提, 王旭. 塔里木盆地沙尘天气的气候特征[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(6): 784-790. [Ma Yu, Xiao Kaiti, Wang Xu. Climatological characteristics of dust weathers in the Tarim Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2006, 42(6): 784-790.]

[7] 马禹, 王旭, 康凤琴. 塔里木盆地浮尘影响因子的强度变化[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2007, 43(3): 13-20. [Ma Yu, Wang Xu, Kang Fengqin. Intensity variation of influence factors on floating dust in the Tarim Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2007, 43(3): 13-20.]

[8] Baghbanan P, Ghavidel Y, Farajzadeh M. Spatial analysis of the temporal long-term variations in frequency of dust storm days in Iran [J]. Pure and Applied Geophysics, 2021, 178: 4181-4194.

[9] 孟露, 赵天良, 何清, 等. 近30年塔里木盆地浮尘天气及持续浮尘滞空的气候特征[J]. 气象学报, 2022, 80(2): 322-333. [Meng Lu, Zhao Tianliang, He Qing, et al. Climatic characteristics of floating dust and persistent floating dust over the Tarim Basin in the recent 30 years[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2022, 80(2): 322-333.]

[10] Tai A, Ma P, Chan Y C, et al. Impacts of climate and land cover variability and trends on springtime East Asian dust emission over 1982- 2010: A modeling study[J]. Atmospheric Environment, 2021, 254(D12): 118348.

[11] Wu C, Lin Z, Shao Y, et al. Drivers of recent decline in dust activity over East Asia[J]. Nature Communications, 2022, 13: 7105.

[12] Ghavidel Y, Baghbanan P, Farajzadeh M. Temporal long-term variations in the occurrence of dust storm days in Iran[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2020, 132(6): 885-898.

[13] 翟盘茂, 李晓燕. 中国北方沙尘天气的气候条件[J]. 地理学报, 2003, 58(7): 125- 131. [Zhai Panmao, Li Xiaoyan. On climate background of duststorms over northern China[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(7): 125-131.]

[14] Pi H, Sharratt B, Lei J. Atmospheric dust events in central Asia: Relationship to wind, soil type, and land use[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(12): 6652-6671.

[15] 王森, 王雪姣, 陈东东, 等. 1961—2017年南疆地区沙尘天气的时空变化特征及影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(9): 81-86. [Wang Sen, Wang Xuejiao, Chen Dongdong, et al. The spatial and temporal variation characteristics and influencing factors of dust weather in the southern Xinjiang from 1961 to 2017[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(9): 81-86.]

[16] 杨显玉, 朱俊橙, 文军, 等. 南疆大风气候特征分析及其对沙尘天气的影响[J]. 高原气象. 2023, 42(1): 186-196. [Yang Xianyu, Zhu Juncheng, Wen Jun, et al. Analysis on characteristics of gale climate in south Xinjiang and its influence on sandstorm[J]. Plateau Meteorology, 2023, 42(1): 186-196.]

[17] Xiao F J, Zhou C P, Liao Y M. Dust storms evolution in Taklimakan Desert and its correlation with climatic parameters[J]. Journal of Geographical Sciences, 2008, 18(4): 415-424.

[18] Theil H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, in: henri theil' s contributions to economics and

econometrics[J]. Advanced Studies in Theoretical and Applied Econornetrics, 1992, 23: 345-381.

[19] 屠爽爽, 简代飞, 龙花楼, 等. 广西主要农作物生产格局演变特征与机制研究[J]. 地理学报, 2022, 77(9): 2322-2337. [Tu Shuangshuang, Jian Daifei, Long Hualou, et al. Evolution characteristics and mechanism of major crops production patterns in Guangxi [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(9): 2322-2337.]

[20] 庄慧敏, 张朝, 程飞, 等. 1992—2018年中国旱作农田土壤湿度的时空模式及气象驱动因素[J]. 地理学报, 2022, 77(9): 2308-2321. [Zhuang Huimin, Zhang Zhao, Cheng Fei, et al. Spatiotemporal pattern of soil moisture and its meteorological driving factors in dry croplands across China from 1992 to 2018[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(9): 2308-2321.]

[21] 李志林, 刘启亮, 唐建波. 尺度驱动的空间聚类理论[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1534-1548. [Li Zhilin, Liu Qiliang, Tang Jianbo. Towards a scale-driven theory for spatial clustering[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1534-1548.]

[22] 李菲菲, 周霞, 周玉玺. 西北地区农业干旱脆弱性评估及时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2023, 40(4): 663-669. [Li Feifei, Zhou Xia, Zhou Yuxi. Vulnerability assessment and spatiotemporal distribution of agricultural drought in Northwest China[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 663-669.]

[23] 韩永翔, 方小敏, 宋连春, 等. 塔里木盆地中的大气环流及沙尘暴成因探讨——根据沙漠风积地貌和气象观测重建的风场[J]. 大气科学, 2005, 29(4): 627-635. [Han Yongxiang, Fang Xiaomin, Song Lianchun, et al. A study of atmospheric circulation and dust storm causes of formation in the Tarim Basin—the restructured wind field by shapes of dune and observed prevailing wind[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2005, 29(4): 627-635.]

[24] Yang X H, Shen S H, Yang F, et al. Spatial and temporal variations of blowing dust events in the Taklimakan Desert[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 125(3-4): 669-677.

[25] Mu L M, Su J, Mo X Y, et al. The temporal-spatial variations and potential causes of dust events in Xinjiang Basin during 1960-2015[J]. Frontiers in Environmental Science, 2021, 9: 727844.

[26] Huang J X, Zhang Q B, Tan J, et al. Association between forestry ecological engineering and dust weather in Inner Mongolia: A panel study[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2018, 104: 76-83.

[27] Du Z Q, Rong R, Wu Z T, et al. Examining the efficacy of revegetation practices in ecosystem restoration programs: Insights from a hotspot of sandstorm in northern China[J]. Frontiers of Earth Science, 2021, 15(4): 922-935.

Spatial characteristics of sand-dust weather days and influencing factors in the Tarim Basin

CHENG Hongxia[1], LIN Yuejiang[2], CHEN Peng[1], LIANG Fengchao[1], WANG Yong[1]

(1. Urumqi Meteorological Satellite Station, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Branch of CMA Training Centre, Urumqi 830013, Xinjiang, China)

Abstract: This study used the Sen+M-K trend analysis, the gravity center movement model, the standardized regression coefficient, and the spatial clustering methods to reveal the spatial characteristics of the variation, trends, and movement of dust days of various types and the contribution rate of their influencing factors in the Tarim Basin based on the annual data of 32 meteorological stations between 1964 and 2022. The results indicated: (1) Floating dust, followed by blowing sand and sandstorms, dominate the Tarim Basin, showing a spatial distribution pattern of more in the south and less in the north, and the dust days of various types show significantly decreasing trends. (2) The gravity centers of dust days of various types in the Tarim Basin tended to move southeast, and the gravity center of sandstorm days moved the most. (3) Warmer temperatures, lower wind speeds, and fewer gale days were the main factors in the decreased dust days in the Tarim Basin, whereas precipitation had the least influence. (4) The high contribution rates of precipitation to dust days are clustered in the western part of the Tarim Basin, mean temperature and mean maximum temperature in the southern and western parts, respectively, and gale days and mean wind speed in the northwestern and southeastern parts, respectively. This study's results can provide a scientific basis for developing regionally applicable wind-breaking and sand-fixing measures in the Tarim Basin.

Keywords: dust days; gravity center movement model; influencing factor; contribution rate; spatial clustering; Tarim Basin